

# 像散对径向偏振无衍射光束产生的影响

林惠川<sup>1</sup> 蒲继雄<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>三明学院机电工程学院, 福建 三明 365004

<sup>2</sup>华侨大学信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021

**摘要** 基于惠更斯-菲涅耳原理,研究了像散对轴棱锥产生径向偏振无衍射光束的影响。研究表明,当轴棱锥像散值达到 $0.1\lambda$ 时,轴棱锥聚焦径向偏振光束得到的径向偏振无衍射光束,其径向偏振特性将失去。而随着像散值的增大,径向偏振无衍射光束的无衍射区域逐渐缩短,当像散值达到 $0.2\lambda$ 时,无衍射特性将消失。径向偏振特性与无衍射特性的消失并不同步,这一结果表明利用轴棱锥产生径向偏振无衍射光束时,光束的偏振特性受像散的影响比无衍射特性大。实验中采用轴棱锥中心轴偏离光轴的方法,验证了像散对产生径向偏振无衍射光束的影响,实验结果与理论分析基本吻合。研究结果将使径向偏振无衍射光束的实现更加灵活准确。

**关键词** 物理光学; 像散; 轴棱锥; 径向偏振; 无衍射

中图分类号 O436 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.012602

## Influence of Astigmatism on the Generation of Radial Polarized Non-Diffracting Beams

Lin Huichuan<sup>1</sup> Pu Jixiong<sup>2</sup>

<sup>1</sup>College of Electromechanical Engineering, Sanming University, Sanming, Fujian 365004, China

<sup>2</sup>College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021, China

**Abstract** Based on the Huygens-Fresnel principle, the influence of astigmatism on the generation of radial polarized non-diffracting beams by the axicon is investigated. Research results show that when the value of the axicon astigmatism is  $0.1\lambda$ , the radial polarized distribution of radial polarized non-diffracting beams generated by axicon focusing radial polarized beams vanishes. Non-diffracting property of the radial polarized non-diffracting beams loses gradually, when the value of astigmatism increases. Particularly when the value of the astigmatism is  $0.2\lambda$ , the non-diffracting property vanishes. The vanishing of the radial polarized distribution and the non-diffracting property are not synchronized. This result demonstrates that in the generation of radial polarized non-diffracting beams by the axicon, the polarization property of beams is affected more by the astigmatism than the non-diffracting property. By using of the divergence between the optical axial and the central axial of the axicon in the experiments, the influence of astigmatism on the generation of radial polarized non-diffracting beams is verified. The experimental results are basically consistent with theoretical analysis. The research results will enable the generation of the radial polarized non-diffracting beams more flexible and accurate.

**Key words** physical optics; astigmatism; axicon; radial polarization; non-diffraction

**OCIS codes** 260.5430; 050.1960; 080.3630

## 1 引言

偏振是光束的一个重要特性,激光器出射的光束一般是线偏振光或者非偏振光,近年来一些特殊偏振分布的光束引起了研究人员的广泛关注,其中很典型的一个例子是径向偏振光束,即光束的偏振方向沿着径向方向<sup>[1-10]</sup>。由于其独特的偏振特性以及聚焦特性,径向偏振光束在粒子加速、粒子囚禁、高分辨率显微技

收稿日期: 2014-07-17; 收到修改稿日期: 2014-07-30; 网络出版日期: 2014-12-23

基金项目: 国家自然科学基金(11304104,61178015)、福建省自然科学基金(2013J01248)

作者简介: 林惠川(1984—),男,硕士,讲师,主要从事激光光束传输与变换等方面的研究。E-mail: lhc703@hqu.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: jixiong@hqu.edu.cn

术及材料加工中获得了广泛的研究与应用<sup>[11-15]</sup>。在激光准直与光束衍射方面,1987年美国罗切斯特大学Durnin<sup>[16]</sup>提出无衍射光束的概念,由于在高精度定向以及准直光学系统中的广泛应用,无衍射光束一直受众多研究者的关注<sup>[16-21]</sup>。因此将光束的径向偏振特性与光束的无衍射特性结合起来,考虑得到径向偏振无衍射光束将很有意义。孙顺红等<sup>[21]</sup>把无衍射光束以及光束的径向偏振特性联系起来,从实验上得到了径向偏振无衍射光束。

在各类光学系统的设计中,像差往往难以克服,作为产生无衍射光束常用的光学元件之一,轴棱锥的加工也是如此。Tanaka等<sup>[22]</sup>研究了像差对轴棱锥衍射特性的影响,研究发现衍射特性只受像散的影响跟彗差无关。在利用轴棱锥产生Bessel白光时,白光中心出现分裂<sup>[23-24]</sup>,这种非理想的Bessel光主要是受轴棱锥轴外像散以及加工误差的影响所致<sup>[22,25]</sup>。因此,在利用轴棱锥产生径向偏振无衍射光束时,考虑像散对径向偏振无衍射光束的影响将是很有意义的研究工作。基于此,本文从理论以及实验上研究了像散像差对轴棱锥产生径向偏振无衍射光束的影响,包括偏振特性以及无衍射特性。

## 2 理论分析

在径向偏振光束的研究中,径向偏振光束的光场表示为<sup>[21]</sup>

$$\mathbf{E}_0(r, \varphi) = \frac{\mathbf{r}}{w} \exp\left(-\frac{r^2}{w^2}\right), \quad (1)$$

式中 $w$ 为光束的束腰半径, $\mathbf{r}$ 为径向矢量, $r$ 为光束截面上的径向坐标, $\varphi$ 为角向坐标。利用轴棱锥产生径向偏振光束,可考虑轴棱锥的振幅透射率为<sup>[25]</sup>

$$\tau(r) = \begin{cases} \exp[-ik(n-1)\gamma r], & r \leq R \\ 0, & r > R \end{cases}, \quad (2)$$

式中 $k=2\pi/\lambda$ 为光束的波数, $n$ 为轴棱锥材料的折射率, $\gamma$ 为轴棱锥的锥角, $R$ 为轴棱锥孔径半径。径向偏振光束经轴棱锥聚焦,利用菲涅耳衍射积分可表示为

$$E_x(\rho, \theta, z) = \left(-\frac{i}{\lambda z}\right) \exp(ikz) \iint \frac{r \cos \varphi}{w} \exp\left(-\frac{r^2}{w^2}\right) \exp[-ik(n-1)\gamma r] \times \exp\left[\frac{ik(\rho^2 + r^2)}{2z}\right] \exp\left[-\frac{ik\rho r}{z} \cos(\varphi - \theta)\right] r dr d\varphi, \quad (3)$$

$$E_y(\rho, \theta, z) = \left(-\frac{i}{\lambda z}\right) \exp(ikz) \iint \frac{r \sin \varphi}{w} \exp\left(-\frac{r^2}{w^2}\right) \exp[-ik(n-1)\gamma r] \times \exp\left[\frac{ik(\rho^2 + r^2)}{2z}\right] \exp\left[-\frac{ik\rho r}{z} \cos(\varphi - \theta)\right] r dr d\varphi. \quad (4)$$

(3)式为径向偏振光束的 $x$ 向偏振分量,(4)式为 $y$ 向偏振分量, $\rho$ 为接收面的径向坐标, $\theta$ 为接收面的角向坐标, $z$ 为传输距离。当轴棱锥存在像散时,引入如下像散因子<sup>[22]</sup>:

$$W(r, \varphi, R) = CR_1^2 r^2 \cos^2 \varphi, \quad (5)$$

式中 $C=kn\lambda \sin \eta$  ( $\eta$ 为轴棱锥偏离光束光轴的夹角)<sup>[26]</sup>, $l$ 为光束经轴棱锥聚焦前的长度单位, $R_1$ 为像斑的光斑半径。考虑轴棱锥的像散,则(3)式与(4)式变为

$$E_x(\rho, \theta, z) = -\frac{i}{\lambda z} \exp(ikz) \iint \frac{r \cos \varphi}{w} \exp\left(-\frac{r^2}{w^2}\right) \exp\left\{ik\left[CR^2 r^2 \cos^2 \varphi - (n-1)\gamma r\right]\right\} \times \exp\left[\frac{ik(\rho^2 + r^2)}{2z}\right] \exp\left[-\frac{ik\rho r}{z} \cos(\varphi - \theta)\right] r dr d\varphi, \quad (6)$$

$$E_y(\rho, \theta, z) = -\frac{i}{\lambda z} \exp(ikz) \iint \frac{r \sin \varphi}{w} \exp\left(-\frac{r^2}{w^2}\right) \exp\left\{ik\left[CR^2 r^2 \cos^2 \varphi - (n-1)\gamma r\right]\right\} \times \exp\left[\frac{ik(\rho^2 + r^2)}{2z}\right] \exp\left[-\frac{ik\rho r}{z} \cos(\varphi - \theta)\right] r dr d\varphi. \quad (7)$$

对(6)式与(7)式作积分简化可得

$$E_x(\rho, \theta, z) = \frac{k}{2z} \exp(ikz) \int_0^\infty \sum_{l=-\infty}^\infty J_l\left(\frac{kCR^2 r^2}{2}\right) \exp\left\{ik\left[\frac{CR^2 r^2}{2} - (n-1)\gamma r\right] - \frac{r^2}{w^2} + \frac{ik}{2z}(r^2 + \rho^2)\right\} \times \left\{ \exp[i(2l+1)\theta] J_{2l+1}\left(\frac{k\rho r}{z}\right) - \exp[i(2l-1)\theta] J_{2l-1}\left(\frac{k\rho r}{z}\right) \right\} \frac{r^2}{w} i^{-l} dr, \quad (8)$$

$$E_y(\rho, \theta, z) = \frac{k}{2z} \exp(ikz) \int_0^{\infty} \sum_{l=-\infty}^{\infty} J_l \left( \frac{kCR^2 r^2}{2} \right) \exp \left\{ ik \left[ \frac{CR^2 r^2}{2} - (n-1)\gamma r \right] - \frac{r^2}{w^2} + \frac{ik}{2z} (r^2 + \rho^2) \right\} \times \left\{ \exp[i(2l+1)\theta] J_{2l+1} \left( \frac{kr\rho}{z} \right) + \exp[i(2l-1)\theta] J_{2l-1} \left( \frac{kr\rho}{z} \right) \right\} \frac{r^2}{w} i^{-l-1} dr. \quad (9)$$

(8)式与(9)式为径向偏振光束经像散轴棱锥聚焦后  $x$  向偏振分量与  $y$  向偏振分量的场表达式,从(8)式与(9)式可以看出,由于像散的存在聚焦后光束的  $x$  向偏振分量与  $y$  向偏振分量并不相等,且相位也不一致。因此当轴棱锥存在像散,轴棱锥聚焦径向偏振光束得到的径向偏振无衍射光束将受到影响。由(8)式与(9)式可得到聚焦后光束的光强为

$$I(\rho, \theta, z) = |E_x(\rho, \theta, z)|^2 + |E_y(\rho, \theta, z)|^2. \quad (10)$$

为了进一步研究像散对产生径向偏振无衍射光束的影响,下面将对像散轴棱锥聚焦径向偏振光束进行数值计算。

### 3 数值计算

由(10)式模拟计算像散对轴棱锥聚焦径向偏振光束的光强的影响,结果如图1所示,其中  $\lambda = 632.8 \times 10^{-6} \text{ mm}$ ,  $w = 5 \text{ mm}$ ,  $n = 1.50$ ,  $\gamma = 0.5^\circ$ ,  $z = 500 \text{ mm}$ 。

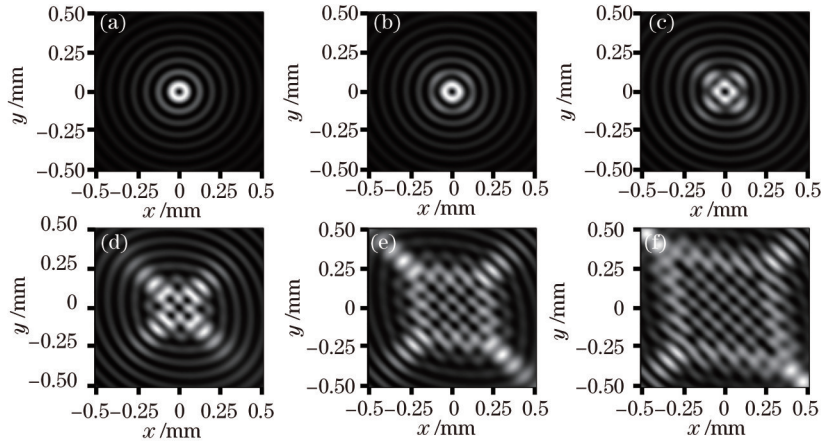


图1 轴棱锥聚焦径向偏振光束的光强分布。(a)  $C=0$ ; (b)  $C=0.05 \lambda$ ; (c)  $C=0.1 \lambda$ ; (d)  $C=0.2 \lambda$ ; (e)  $C=0.4 \lambda$ ; (f)  $C=0.6 \lambda$

Fig.1 Intensity distributions of radial polarized beams after being focused by the axicon. (a)  $C=0$ ; (b)  $C=0.05 \lambda$ ; (c)  $C=0.1 \lambda$ ; (d)  $C=0.2 \lambda$ ; (e)  $C=0.4 \lambda$ ; (f)  $C=0.6 \lambda$

由图1可知当轴棱锥存在像散时,径向偏振光束经其聚焦后,聚焦场的光强分布随着像散值的增大逐渐发生畸变。当像散值  $C=0.1 \lambda$  时,外环光强仍近似为圆环分布,而中心两环已变成方形分布。而随着像散的继续增大,整个光斑出现菱形状。且中心空心区域随着像散值的增大逐渐分裂,当像散值  $C=0.2 \lambda$  时,中心空心区域已分裂为5个空心区域,当像散值继续增大空心区域的分裂个数继续增加。

由图1可知,当轴棱锥存在像散时,经轴棱锥聚焦后得到的径向偏振无衍射光束光强发生的畸变。在光强发生畸变时,光束的径向偏振特性发生怎样的变化则需要考虑。图2为径向偏振光束经像散轴棱锥聚焦后,  $y$  向偏振分量的光强分布,计算参数同图1。

由图2可知,随着像散的逐渐增大,径向偏振光束的径向偏振特性逐渐消失,图2中左下角的箭头为光束的偏振方向。当像散值  $C=0.1 \lambda$  时,中心两环的光强分布已失去径向偏振特性( $x$ 轴上的光强不为零, $y$ 轴上的光强分布不均匀)。而当像散值继续增大,外环光强的变化表明,经轴棱锥聚焦后,由于像散的存在径向偏振光束的径向偏振特性将消失,特别是当像散值达到  $C=0.1 \lambda$  时,光束的径向偏振特性基本失去。

接下来对光束的无衍射特性进行研究。文献[21]的研究结果表明,径向偏振光束经轴棱锥聚焦后可获得径向偏振无衍射光束,而当轴棱锥存在像散时,聚焦光束的无衍射特性是否会受到影响,则需进一步考虑。图3为径向偏振光束经像散轴棱锥聚焦后,沿光轴方向的光强分布,参数同图1。由图3可知,随着像散值的逐渐增大径向偏振光束经轴棱锥的聚焦后,其无衍射特性也逐渐失去,当像散值达到  $C=0.2 \lambda$  时聚焦光束的无衍射特性已基本失去,即在满足菲涅耳衍射积分的近似区域内,聚焦光束已经没有无衍射特性。

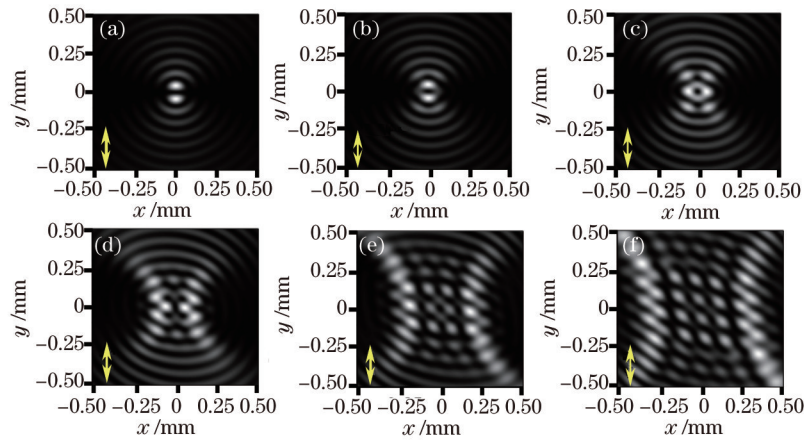


图2 轴棱锥聚焦径向偏振光束 $y$ 向偏振分量的光强分布。(a)  $C=0$ ; (b)  $C=0.05\lambda$ ; (c)  $C=0.1\lambda$ ; (d)  $C=0.2\lambda$ ; (e)  $C=0.4\lambda$ ; (f)  $C=0.6\lambda$

Fig.2 Intensity distributions of  $y$  polarization component of radial polarized beams after being focused by the axicon.

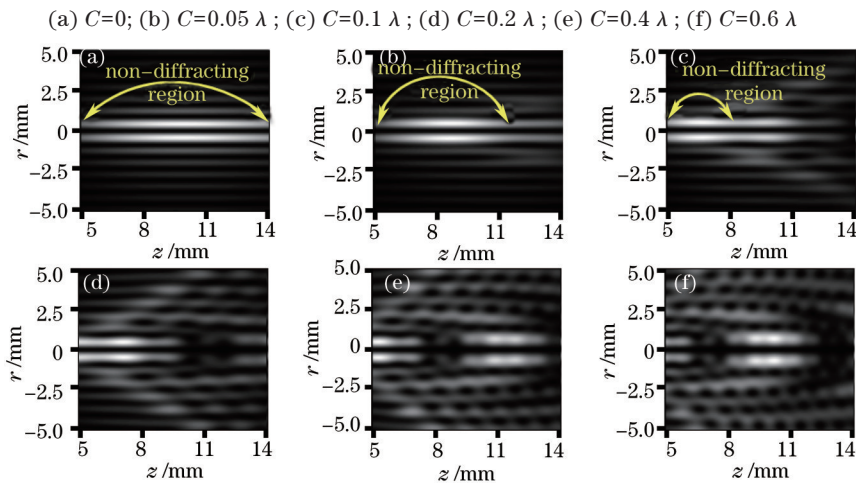


图3 轴棱锥聚焦径向偏振光束光强的纵向分布。(a)  $C=0$ ; (b)  $C=0.05\lambda$ ; (c)  $C=0.1\lambda$ ; (d)  $C=0.2\lambda$ ; (e)  $C=0.4\lambda$ ; (f)  $C=0.6\lambda$

Fig.3 Intensity distributions of radial polarized beams after being focused by the axicon in longitudinal direction.

(a)  $C=0$ ; (b)  $C=0.05\lambda$ ; (c)  $C=0.1\lambda$ ; (d)  $C=0.2\lambda$ ; (e)  $C=0.4\lambda$ ; (f)  $C=0.6\lambda$

## 4 实 验

为了验证第3节理论计算结果,下面将从实验上分析像散对轴棱锥聚焦径向偏振光束的影响。实验光路图如图4所示,氦氖激光扩束后经偏振转换器件进行偏振转换后,得到径向偏振光束。实验中采用3 mW He-Ne激光器(波长632.8 nm)作为光源,轴棱锥的锥角 $\gamma=0.5^\circ$ ,轴棱锥折射率 $n=1.458$ 。在实验中轴棱锥的像散采用轴棱锥中心轴偏离光轴代替,偏离角度的大小用 $\eta$ 表示。轴棱锥固定在精密旋转台上,旋转台技

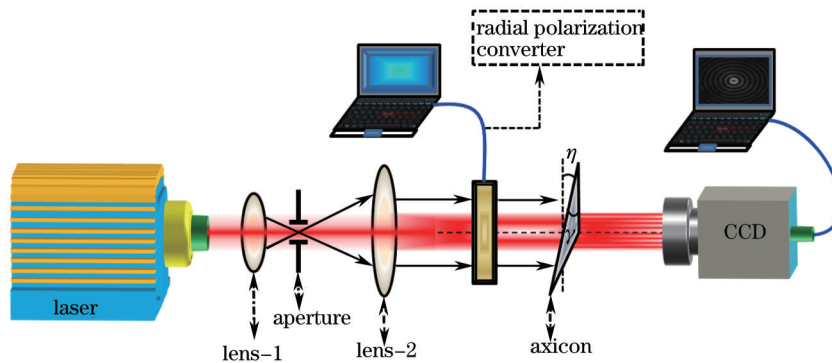


图4 实验装置示意图

Fig.4 Schematic of the experimental setup

术指标为  $1^\circ$ , 最小读数为  $2'$ 。在轴棱锥的聚焦场中, 聚焦光束的光强由 CCD 采集得到, CCD 镜头前采用三片光衰减片调节入射光强度。

图 5 为不同像散值下, 轴棱锥聚焦径向偏振光束的光强分布。与图 1 所示的模拟结果基本相吻合, 随着像散值的逐渐增大聚焦光束的光强逐渐发生畸变。内环光强分布变化的较快, 畸变由内向外。且随着像散值的逐渐增大, 中心空心区域逐渐分裂。当像散值增大到  $C=0.2\lambda$  时, 聚焦光束的中心空心区域分裂为 5 个空心区, 实验结果与模拟结果吻合的很好, 说明上述像散轴棱锥对聚焦径向偏振光束的影响的理论分析是正确的。实验中像散值  $C=0.05\lambda$  对应的轴棱锥偏角近似为  $\eta = 5^\circ$ ,  $C=0.1\lambda$  近似为  $\eta = 10^\circ$ ,  $C=0.2\lambda$  近似为  $\eta = 20^\circ$ ,  $C=0.4\lambda$  近似为  $\eta = 40^\circ$ ,  $C=0.6\lambda$  近似为  $\eta = 60^\circ$ 。

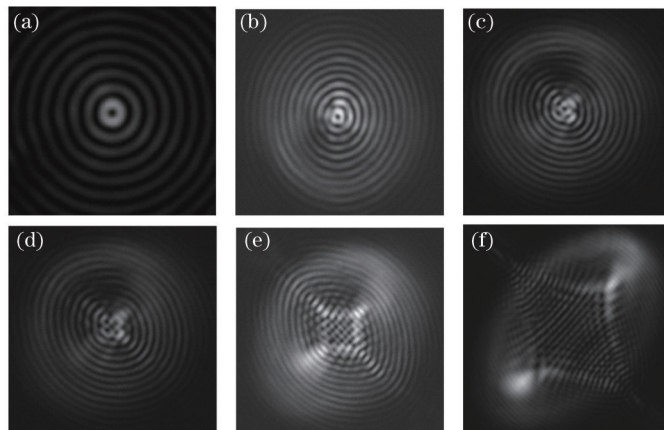


图 5 轴棱锥聚焦径向偏振光束的光强分布实验结果。(a)  $C=0$ ; (b)  $C=0.05\lambda$ ; (c)  $C=0.1\lambda$ ; (d)  $C=0.2\lambda$ ; (e)  $C=0.4\lambda$ ; (f)  $C=0.6\lambda$

Fig.5 Experimental results of intensity distributions of radial polarized beams after being focused by the axicon.

(a)  $C=0$ ; (b)  $C=0.05\lambda$ ; (c)  $C=0.1\lambda$ ; (d)  $C=0.2\lambda$ ; (e)  $C=0.4\lambda$ ; (f)  $C=0.6\lambda$

光学系统存在像散时, 从如图 5 所示光强分布来看, 理论上分析像散对产生径向偏振无衍射光束的影响是正确的, 理论分析指出像散对产生径向偏振无衍射光束的影响, 除了影响其光强分布及无衍射特性, 还对聚焦光束的偏振有影响。因此, 下面在实验上验证像散对聚焦光束的偏振特性的影响。聚焦光束的偏振特性需要放置偏振片来检验, 在图 4 所示的光路图中, 聚焦光束进入 CCD 之前先经一偏振片(为与数值计算保持一致, 偏振片偏振方向为  $y$  向), 图 6 为实验结果。图 6 的实验结果与图 2 的模拟结果基本吻合, 实验结果表明随着像散值的逐渐增大, 轴棱锥聚焦得到的径向偏振无衍射光束的径向偏振特性逐渐失去, 光束的径向偏振特性由内向外逐渐失去, 当像散值  $C=0.1\lambda$  时, 中心两环的光强分布已失去径向偏振特性。

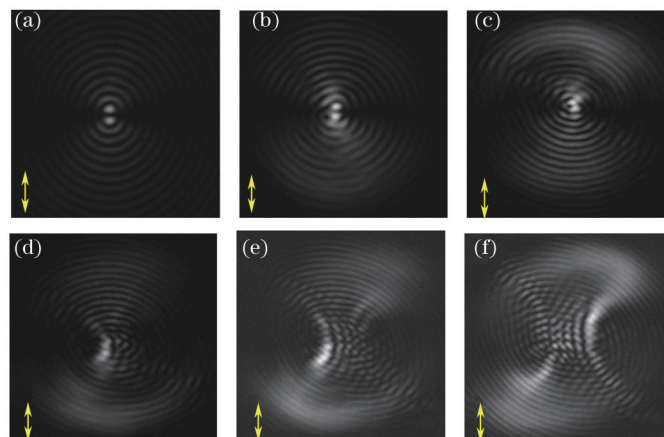


图 6 轴棱锥聚焦径向偏振光束  $y$  向偏振分量的光强分布实验结果。(a)  $C=0$ ; (b)  $C=0.05\lambda$ ; (c)  $C=0.1\lambda$ ; (d)  $C=0.2\lambda$ ; (e)  $C=0.4\lambda$ ; (f)  $C=0.6\lambda$

Fig.6 Experimental results of intensity distribution of  $y$  polarization component of radial polarized beams after being focused by the axicon. (a)  $C=0$ ; (b)  $C=0.05\lambda$ ; (c)  $C=0.1\lambda$ ; (d)  $C=0.2\lambda$ ; (e)  $C=0.4\lambda$ ; (f)  $C=0.6\lambda$

## 5 结 论

研究了像散对轴棱锥聚焦径向偏振光束产生的径向偏振无衍射光束的影响。研究表明,当轴棱锥存在像散时,轴棱锥聚焦径向偏振光束所获得的聚焦光束的偏振特性,无衍射特性都将受到影响,当轴棱锥像散值达到  $0.1\lambda$  时,径向偏振特性将失去,当像散值达到  $0.2\lambda$  时,无衍射特性将消失。而径向偏振特性与无衍射特性受像散的影响并不相同,径向偏振特性更快消失表明光束偏振特性受像散的影响更为敏感。实验上采用调节轴棱锥的中心轴使其偏离光轴的方法来模拟像散,而实验结果与数值计算吻合的很好,这一结果进一步证实像散对产生径向偏振无衍射光束的影响。研究表明可通过调节光学调整架来消除像散,提高用轴棱锥产生径向偏振无衍射光束的质量。

## 参 考 文 献

- 1 R Dorn, S Quabis, G Leuchs. Sharper focus for a radially polarized light beam[J]. *Phys Rev Lett*, 2003, 91(23): 233901.
- 2 Xia Kegui, Li Jianlang. Recent development in radially polarized solid-state laser with composite laser crystal[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(8): 080015.  
夏克贵, 李建郎. 基于键合晶体的径向偏振固体激光器研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(8): 080015.
- 3 Guo Ling, Li Jinsong. Phase pupil filter with cosine function for sharper focus of radially polarized beam[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(12): 121001.  
郭 玲, 李劲松. 余弦型相位光瞳滤波器缩小径向偏振光焦斑[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(12): 121001.
- 4 Chen Huifang, Liu Tao, Zhang Zaixuan. Sharper focus of radially polarized beam with a continuous phase filter[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(6): 0616001.  
陈慧芳, 刘 涛, 张在宣. 连续相位滤波器缩小径向偏振光束焦斑[J]. *中国激光*, 2012, 39(6): 0616001.
- 5 W C Kim, N C Park, Y J Yoon, *et al.*. Investigation of near-field imaging characteristics of radial polarization for application to optical data storage[J]. *Opt Rev*, 2007, 14(4): 236-242.
- 6 W T Tang, E Y S Yew, C J R Sheppard. Polarization conversion in confocal microscopy with radially polarized illumination[J]. *Opt Lett*, 2009, 34(14): 2147-2149.
- 7 K S Youngworth, T G Brown. Focusing of high numerical aperture cylindrical-vector beams[J]. *Opt Express*, 2000, 7(2): 77-87.
- 8 Ren Guangsen, Wu Wuming, Ning Yu, *et al.*. Tight focusing of a radially polarized coherent beams array[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(1): 0102003.  
任广森, 吴武明, 宁 禹, 等. 径向偏振相干光束阵列的深聚焦[J]. *中国激光*, 2014, 41(1): 0102003.
- 9 Cheng Kan, Tan Qiaofeng, Zhou Zhehai, *et al.*. Design of three-dimensional superresolution diffractive optical elements for radially polarized beam[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(11): 3295-3299.  
程 侃, 谭峭峰, 周哲海, 等. 径向偏振光三维超分辨衍射光学元件设计[J]. *光学学报*, 2010, 30(11): 3295-3299.
- 10 Y Kozawa, S Sato. Generation of a radially polarized laser beam by use of a conical Brewster prism[J]. *Opt Lett*, 2005, 30(22): 3063-3065.
- 11 C Varin, M Piche. Acceleration of ultra-relativistic electrons using high-intensity TM<sub>01</sub> laser beams[J]. *Appl Phys B*, 2002, 74(1): s83-s88.
- 12 Y I Salamin. Acceleration in vacuum of bare nuclei by tightly focused radially polarized laser light[J]. *Opt Lett*, 2007, 32(23): 3462-3464.
- 13 T Kuga, Y Torii, N Shiokawa, *et al.*. Novel optical trap of atoms with a doughnut beam[J]. *Phys Rev Lett*, 1997, 78(25): 4713-4717.
- 14 V G Niziev, A V Nesterov. Influence of beam polarization on laser cutting efficiency[J]. *J Phys D*, 1999, 32(13): 1455-1461.
- 15 Tian Bo, Pu Jixiong. Trapping two types of particles using a partially coherent radially polarized doughnut beam[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(s1): s102006.  
田 博, 蒲继雄. 部分相干径向偏振光束对两种粒子的捕获[J]. *中国激光*, 2011, 38(s1): s102006.
- 16 J Durnin. Diffraction-free beams[J]. *Phys Rev Lett*, 1987, 58(15): 1499-1501.
- 17 Y Lin, W Seka, J H Eberly, *et al.*. Experimental investigation of Bessel beam characteristics[J]. *Appl Opt*, 1992, 31(15): 2708-2713.

- 18 A J Cox, J D Anna. Constant-axial-intensity non-diffracting beam[J]. *Opt Lett*, 1992, 17(4): 232-234.
- 19 Gao Zenghui, Lü Baida. Propagation of nonparaxial Bessel-Gaussian beams in free space[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(11): 1732-1735.  
高曾辉, 吕百达. 非傍轴贝塞尔高斯光束在自由空间的传输[J]. *光子学报*, 2005, 34(11): 1732-1735.
- 20 A Ortiz-ambriz, S Lopez-aguayo, Y V Kartashoy, *et al.*. Generation of arbitrary complex quasi-non-diffracting optical patterns[J]. *Opt Express*, 2013, 21(19): 22221-22231.
- 21 Sun Shunhong, Lin Huichuan, Cui Shengwei, *et al.*. Generation and propagation characteristics of the radially polarized non-diffracting beam[J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2012, 42(10): 1022-1028.  
孙顺红, 林惠川, 崔省伟, 等. 径向偏振无衍射光束的产生及其传输特性研究[J]. *中国科学: 物理学, 力学, 天文学*, 2012, 42(10): 1022-1028.
- 22 T Tanaka, S Yamamoto. Comparison of aberration between axicon and lens[J]. *Opt Commun*, 2000, 184(1): 113-118.
- 23 P Fischer, C Brown, J Morris. White light propagation invariant beams[J]. *Opt Express*, 2005, 13(17): 6657-6666.
- 24 P Fischer, H Little, R L Smith. Wavelength dependent propagation and reconstruction of white light Bessel beams[J]. *J Opt A: Pure Appl Opt*, 2006, 8(5): 447-482.
- 25 Jiang Xinguang, Wu Fengtie, Liu Bin. Modification of aberration nondiffraction beams in manufacture error of elliptical axicon[J]. *Chinese J Lasers*, 2007, 34(11): 1538-1542.  
江新光, 吴逢铁, 刘彬. 轴棱锥椭圆加工误差产生畸变无衍射光束的修正[J]. *中国激光*, 2007, 34(11): 1538-1542.
- 26 M Born, E Wolf. *Principles of Optics*[M]. Yang Jiasun, Transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005. 197. 744.  
玻恩, 沃尔夫. *光学原理*[M]. 杨葭荪, 译. 北京: 电子工业出版社, 2005. 197. 744.

栏目编辑: 史敏